

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Christian-Toralf Weber, Michael Markworth, Jürgen Weiser, Volker Herold

Aktive Werkzeuge zum chemisch-mechanischen Polieren

ABSTRACT

Das chemisch-mechanische Planarisieren (CMP) ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Halbleitern, findet aber zunehmend bei der Herstellung von MEMS und optischen Systemen Anwendung. Speicher- und Prozessorchips werden aus dünnen Siliziumscheiben den sog. Wafern gefertigt. Die auf dem Wafer zu erzeugenden Strukturen von heute 90 nm Breite stellen zunehmend höhere Anforderungen an die Genauigkeit des Planarisierungsprozesses, wobei ein möglichst gleichmäßiger Abtrag (removal) über der Fläche des gesamten Wafers erforderlich ist. Vor allem bei der neuen Wafergeneration mit 300 mm Durchmesser (12 Zoll) treten Ungleichmäßigkeiten des Abtragsprofils nicht nur im Randbereich, sondern innerhalb der gesamten Waferfläche auf. Bislang wurde versucht, durch Retaining-Ringe, Rückseitendruck sowie globale konvexe oder konkave Verformung des Wafers bei der Bearbeitung ein gleichmäßiges Abtragsprofil einzustellen.

Die IGAM Ingenieurgesellschaft für angewandte Mechanik hat ein piezogetriebenes formadaptives Polierwerkzeug (Carrier) mit einzeln verstellbaren Ringen und integrierter Ansteuerung entwickelt. Die Auslegung des Carriers erfolgte anhand von Kontaktberechnungen mit finiten Elementen, wobei die Druckverteilung zwischen Wafer und Polierpad berechnet wurde. Aufgrund der hohen Steifigkeit der Piezoelemente kann das Profil des Carriers und somit die Druckverteilung in der Bearbeitungsfläche gezielt mit hoher Genauigkeit unabhängig von Polierdruck über der gesamten Waferfläche eingestellt werden. Das vorgestellte Konzept ist auf Waferdurchmesser im Bereich von 4-12 Zoll anwendbar, wobei die Breite und Anzahl der Ringe weitgehend den Erfordernissen des einzustellenden Abtragsprofils angepasst werden kann.

Mit dem Prototypen wurden an der TU Dresden Polierversuche an Silizium-Testwafern zur Charakterisierung des Abtragsverhaltens auf einer Labor-CMP-Maschine durchgeführt. Die vor dem Polieren mit Druckmessfolien zwischen Polierpad und Wafer gemessene Druckverteilung des angesteuerten Carriers ist identisch mit dem erreichten Abtragsprofil. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gleichmäßige Verteilung des Druck- und Abtragsprofils über den Umfang des Wafers. Ziel weiterer Entwicklungen ist die lokale (nicht rotationssymmetrische) Beeinflussung des Abtragsprofils sowie die Integration von Sensorik zur Regelung des Prozesses.

Einleitung

Chemisch-mechanisches Planarisieren (CMP) ist das wichtigste Verfahren zur Herstellung ultra-präziser Oberflächen in der Halbleiterindustrie und Mikrosystemtechnik (Bild 1). Die Erzeugung einer extremen Planarität von Substraten ist Voraussetzung für die sichere Beherrschung der Lithographie, der Herstellung integrierter Schaltungen und komplexer mikromechanischer Strukturen.

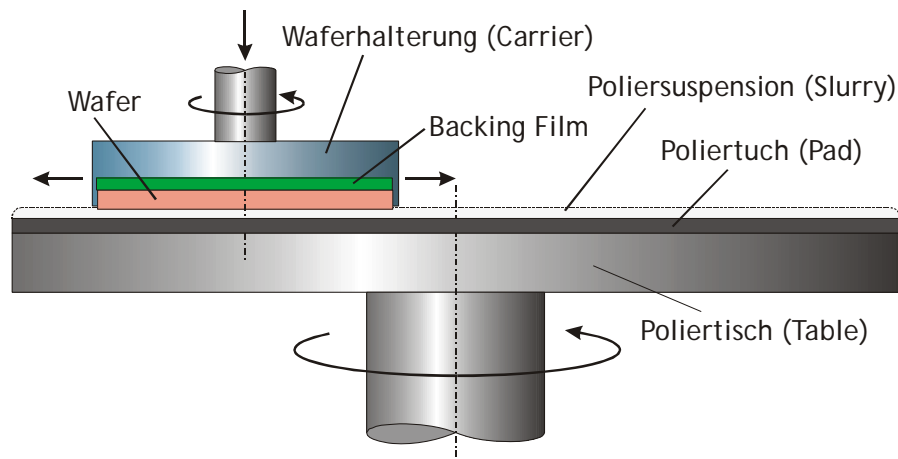


Bild 1: Schematische Darstellung des CMP-Prozesses

Das chemisch-mechanische Planarisieren kombiniert mechanischen Abtrag und einen Ätzabtrag durch entsprechende Chemikalien. Zur Erstellung der elektrischen Leiterbahnstrukturen aus Kupfer wird heute die sogenannte Damascene-Technologie verwendet. In der Isolationsschicht des Halbleiters werden Strukturgräben erzeugt und anschließend die Isolationsschicht mit einer dünnen Barrierschicht überzogen. Danach werden die Strukturgräben mit einem Leitbahnmetall vollständig bis über den oberen Isolatorrand aufgefüllt. Durch einen anschließenden CMP-Polierprozess wird zunächst die Schicht aus Leitbahnmetall bis zur Barrierschicht abpoliert. In einem zweiten Polierschritt wird durch das Polieren die Barrierschicht bis zur Isolatorebene abgetragen. Als Ergebnis liegen auf dem Substrat in eine Barrierschicht eingebettete Leiterbahnen vor.

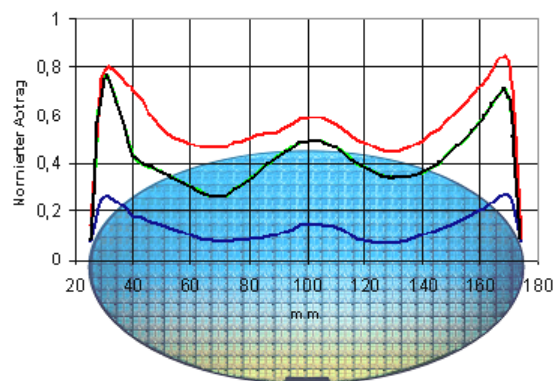


Bild 2: Typische Abtragsprofile (linescans) über dem Durchmesser des Wafers

Bei der gegenwärtig angewendeten CMP-Technologie werden Genauigkeiten des Abtragsprofils über der Waferfläche im Bereich von 20...50 nm erreicht. Bild 2 zeigt typische Verläufe des Abtragsprofils über dem Durchmesser des Wafers. Kritisch ist dabei vor allem der Randbereich, da hier die größten Abweichungen auftreten. [3,4] Zur Reduzierung der Ausschussquote der

Randchips ist eine gezielte Beeinflussung notwendig. Mit weiterer Abnahme der Strukturbreiten von heute 90 nm auf 60 nm bzw. 45 nm in der nächsten bzw. übernächsten Chip-Generation werden in Zukunft Genauigkeiten des Abtragsprofils über die gesamte Waferfläche von 10 nm gefordert sein.

Bei gleichbleibenden Genauigkeitsanforderungen wird die Problematik des gleichmäßigen Abtrages über der gesamten Waferfläche durch die derzeit von allen führenden Halbleiterherstellern beschrittene Vergrößerung des Waferdurchmessers von 200 mm (8 Zoll) auf 300 mm (12 Zoll) zusätzlich verschärft. Durch diese Technologie vergrößert sich die Fläche eines Wafers auf das 2,25-fache. Wegen der gleichzeitig besseren Flächennutzung können etwa 2,4 mal so viele Chips wie auf einem 8-Zoll Wafer untergebracht werden. Zusätzlich ersparen die größeren Wafer etwa ein Drittel der Bearbeitungskosten, die Fertigungsanlagen arbeiten also deutlich kostengünstiger. Auf der einen Seite erfordert diese Umstellung gewaltige Investitionen in neue Fertigungsanlagen und auf der anderen Seite Investitionen in verbesserte oder völlig neue Technologien.

Nach der Flaute der Halbleiterindustrie mit erheblichen Umsatzeinbrüchen in den letzten Jahren wird für die nächste Zeit ein deutliches Wachstum erwartet. Überdurchschnittlich profitieren wird nach entsprechenden Markanalysen (Report Business Communication Company, RGB 288) dabei der weltweite Markt für CMP- und Post-CMP-Ausrüstungen mit einer Steigerung des Volumens von 1700 Mio. US\$ (2003) auf 3300 Mio. US\$ (2008).

ZIELSTELLUNG

Mit immer kleineren Strukturen werden zunehmend höhere Anforderungen an die Genauigkeit des Planarisierungsprozesses, d.h. einen möglichst gleichmäßigen Abtrag (removal rate, RR) mit geringer non-uniformity (WIWNU) gestellt. Es treten dabei jedoch Ungleichmäßigkeiten des Abtragsprofils nicht nur im Randbereich, sondern innerhalb der gesamten Waferfläche auf.

Bislang wurde versucht, durch spezielle Retaining-Ringe, Rückseitendruck sowie pneumatisch oder hydraulisch verformbare Ringe des Carriers ein gleichmäßiges Abtragsprofil einzustellen. Es zeigt sich, dass es bei diesen Verfahren eine starke funktionelle Abhängigkeit zwischen der eingestellten Polierkraft und der lokalen Druckverteilung gibt. Ferner führen durch Reibung entstehende Wärme und die Verteilung der Poliersuspension zu Ungleichförmigkeiten im Abtragsprofil. Wafer mit großem Durchmesser und geringen Strukturbreiten sind somit nur mit sehr hohem Aufwand herzustellen.

Für eine hohe Qualität des Polierprozesses und damit eine möglichst geringe Fehlerquote sind deshalb Werkzeuge von großem Interesse, mit denen gezielt auf das Abtragsprofil eingewirkt

werden kann. Von besonderer Bedeutung bei der hochgenauen Bearbeitung von Oberflächen ist der wirkende Polier- bzw. Anpressdruck. Nach der PRESTON-Hypothese ergibt sich die lokale Abtrennhöhe Δh für abtragende Verfahren (z.B. Läppen, Polieren, CMP) nach der Beziehung

$$\Delta h = k \cdot p \int v(t) dt \quad (1)$$

k-Konstante, v(t)-Geschwindigkeit, t-Bearbeitungszeit

Hieraus wird ersichtlich, dass eine Beeinflussung der lokalen Abtrennhöhe Δh nur über eine lokale Änderung des Druckes p möglich ist und somit einen Ansatz zur determinierten Beeinflussung des Abtragsprofils bietet, während die Geschwindigkeiten verfahrensbedingt durch die Bewegung (Drehzahlverhältnisse) vorgegeben sind und keine lokale Einflussnahme gestatten.

Mittels aktiver oder adaptiver Werkzeuge, deren Oberfläche durch geeignete Aktorik unter weitgehender Eliminierung des Einflusses von Prozessparametern wie Polierdruck, Temperatur oder verwendeter Slurry determiniert verstellbar ist, kann somit die Beeinflussung des Abtragprofils über die Druckverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück realisiert werden.

DESIGN UND BERECHNUNG

Ausgehend von der Zielstellung wurde von der IGAM ein neuartiger aktiver Carrier mit einzeln ansteuerbaren Ringen, die durch Festkörpergelenke untereinander verbunden sind, entwickelt (Bild 3) [1]. Die Ansteuerung des Systems erfolgt mittels des auf dem Carrier angebrachten autarken Elektronikmoduls.

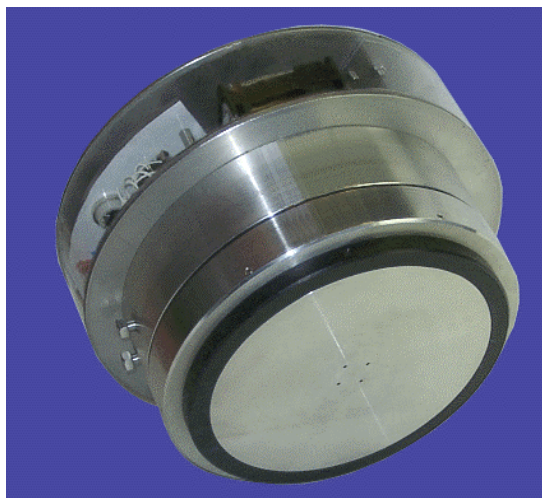


Bild 3: Carrier mit Elektronikmodul

Zur Auslegung des Carriers wurden Kontaktberechnungen mit Finiten Elementen durchgeführt, in deren Ergebnis die Deformation des Carriers und des Wafers sowie die Druckverteilung zwischen Wafer und Poliertuch infolge des Polierdruckes und der Ansteuerung der Aktoren an den einzelnen Ringen (Bild 4) berechnet wurde. Durch FEM-Berechnungen wurden ferner die Feststoffgelenke zwischen den Ringen hinsichtlich Festigkeit und Funktion optimiert.

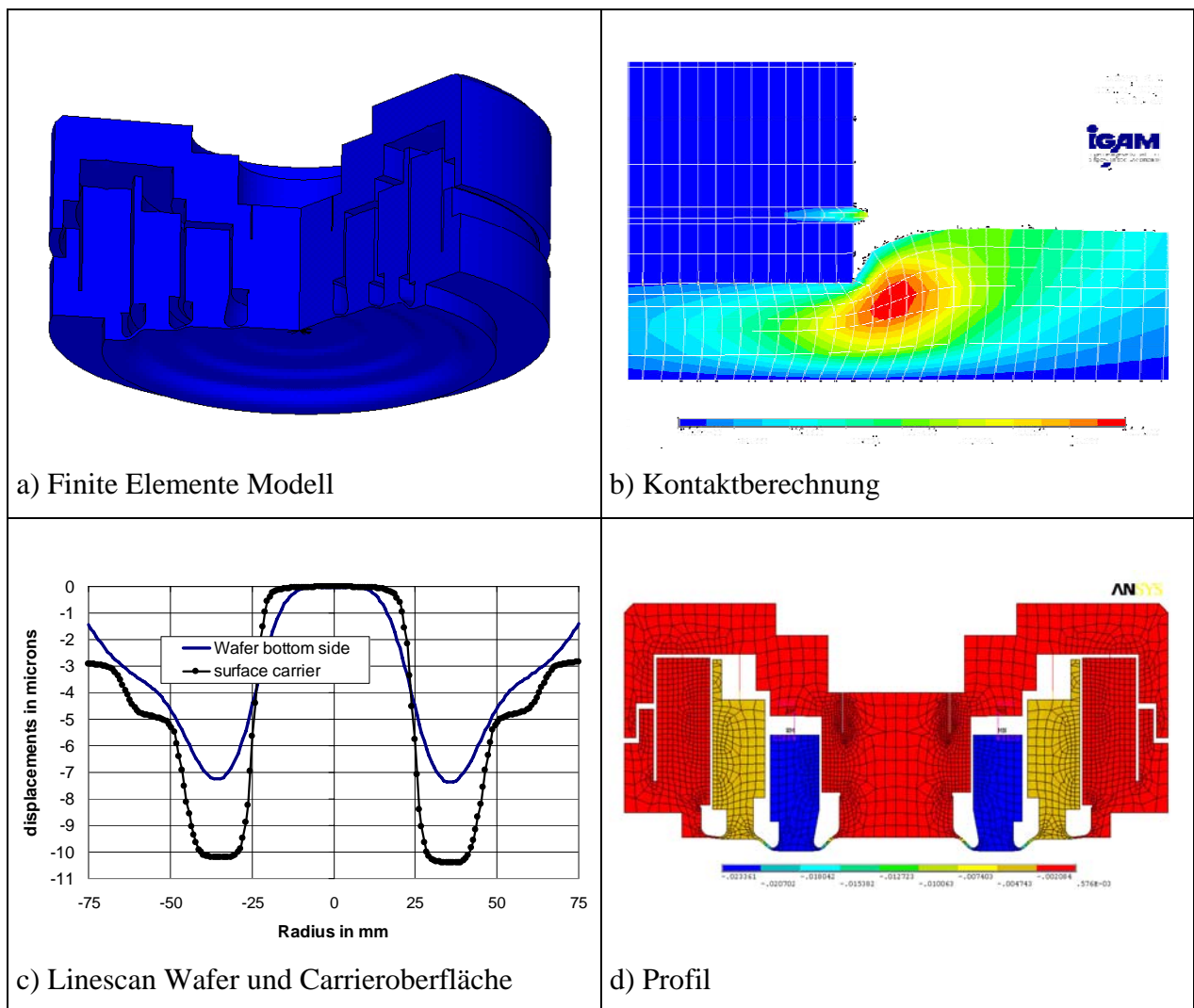


Bild 4: Ergebnisse der FEM-Berechnung

Die im Carrier als Aktoren verwendeten Piezostapel gestatten bei einem Stellweg von $25\ \mu\text{m}$ eine Auflösung von etwa $1\ \text{nm}$ (open loop), beim Einsatz einer Positionsregelung (closed loop) [2] sind Auflösungen im Bereich von $0,3\ \text{nm}$ erreichbar. Zu diesem Zweck sind auf die Piezoaktoren Dehnungsmessstreifen appliziert, so dass mittels einer Positionsregelung das Carrierprofil unabhängig von Prozessparametern wie Polierdruck, variierenden Steifigkeiten und/oder Dicken von Poliertuch und backing-film eingestellt werden kann.

Obwohl pro Ring jeweils nur drei Aktoren angreifen, zeigen die Berechnungsergebnisse einen

sehr gleichmäßigen Verlauf der Deformation und des Druckes in Umfangsrichtung des Wafers. Die Umfangswelligkeit des äußeren Ringes liegt bei etwa 3% des Stellwertes. Durch eine größere Zahl von Aktoren pro Ring kann die Steifigkeit des Systems wesentlich erhöht werden. Beim Einsatz von 6 Aktoren wird die Steifigkeit verdoppelt und die Welligkeit am Umfang beträgt nur 1/8 gegenüber der Variante mit drei Aktoren.

POLIERVERSUCHE

Am IHM der TU Dresden wurden Polierversuche zur Charakterisierung des Abtragsverhaltens des 6''-Prototypen auf einer Labor-CMP-Maschine Mecapol E 460 der Firma Presi durchgeführt. Die Versuche erfolgten an Silizium-Testwafern mit einer Oxidschicht von 1 μm und Abträgen im Bereich von 50-200 nm.

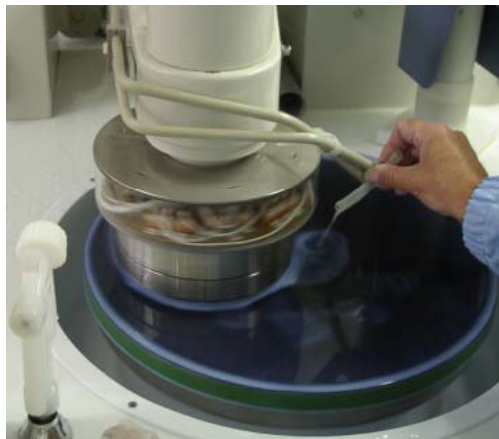


Bild 5: Polierversuche

Die vor dem Polieren mit Druckmessfolien zwischen Polierpad und Wafer gemessene Druckverteilung des angesteuerten Carriers ist identisch mit dem erreichten Abtragsprofil (Bild 6).

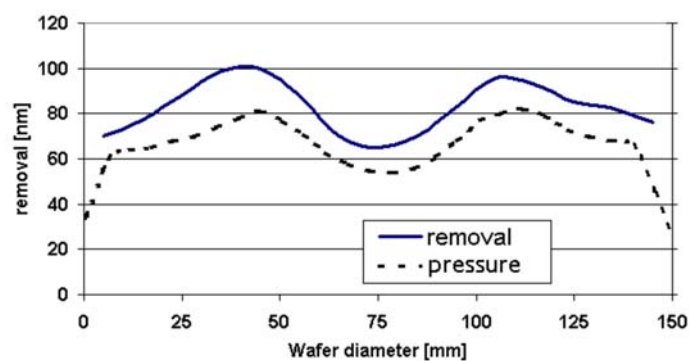


Bild 6: Messung des Abtrags- und Druckprofils

Die Ergebnisse bestätigen einerseits die Preston-Hypothese und zeigen auf der anderen Seite, dass der Druck zwischen Wafer und Poliertuch als Stellgröße für die Regelung des Polierprozesses geeignet ist.

Die Messergebnisse bestätigen die mit der FEM vorausberechnete gleichmäßige, rotationssymmetrische Verteilung des Druck- und Abtragsprofils über den Umfang des Wafers (Bild 7).

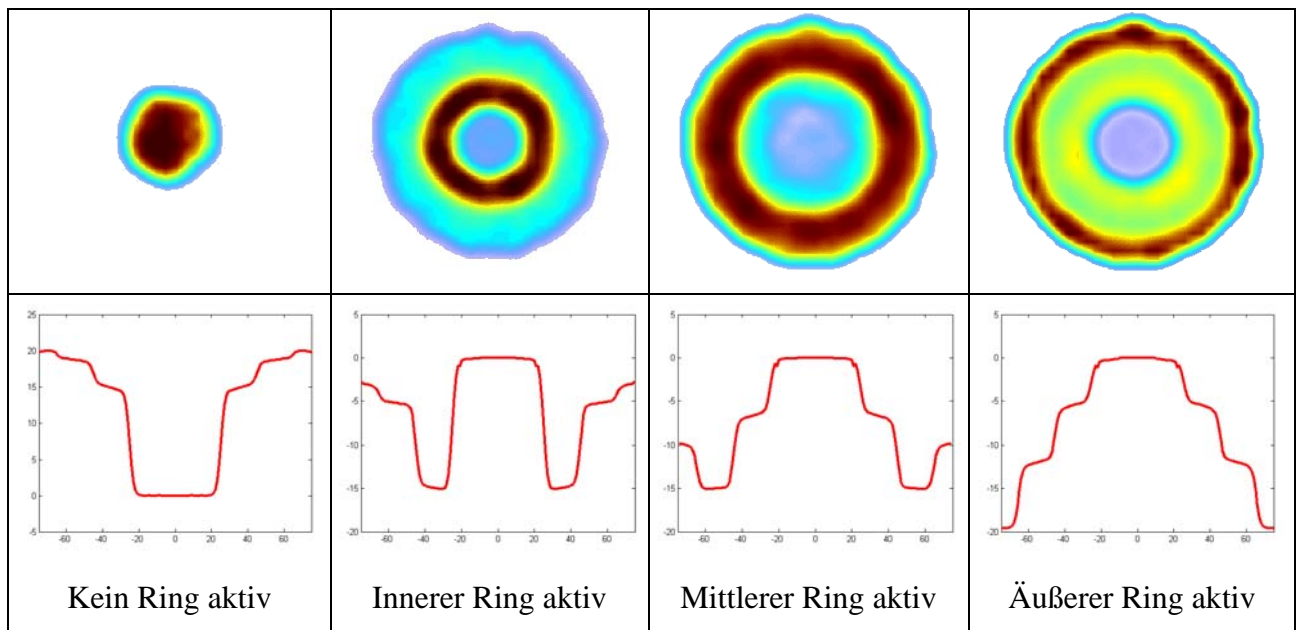


Bild 7: Gemessene Druckverteilung und Linescans

Durch gezielte Ansteuerung der Ringe konnte in einem Korrekturschritt (Bild 8 und 9) die Gleichmäßigkeit des Abtrages (within wafer non-uniformity - WIWNU) um 50% verbessert werden.

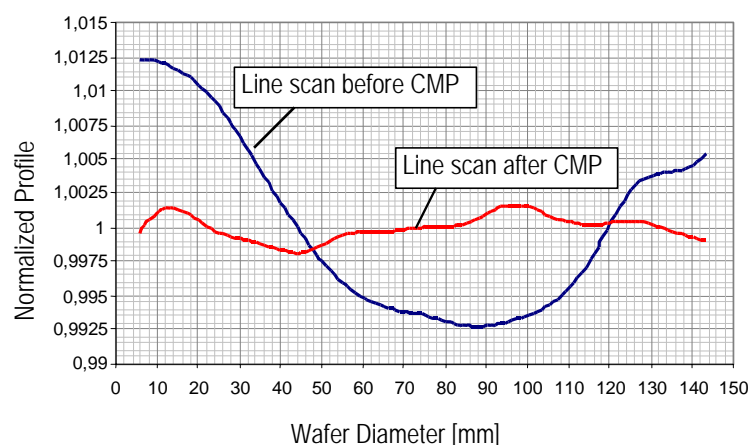


Bild 8: Profil mit und ohne Korrekturschritt

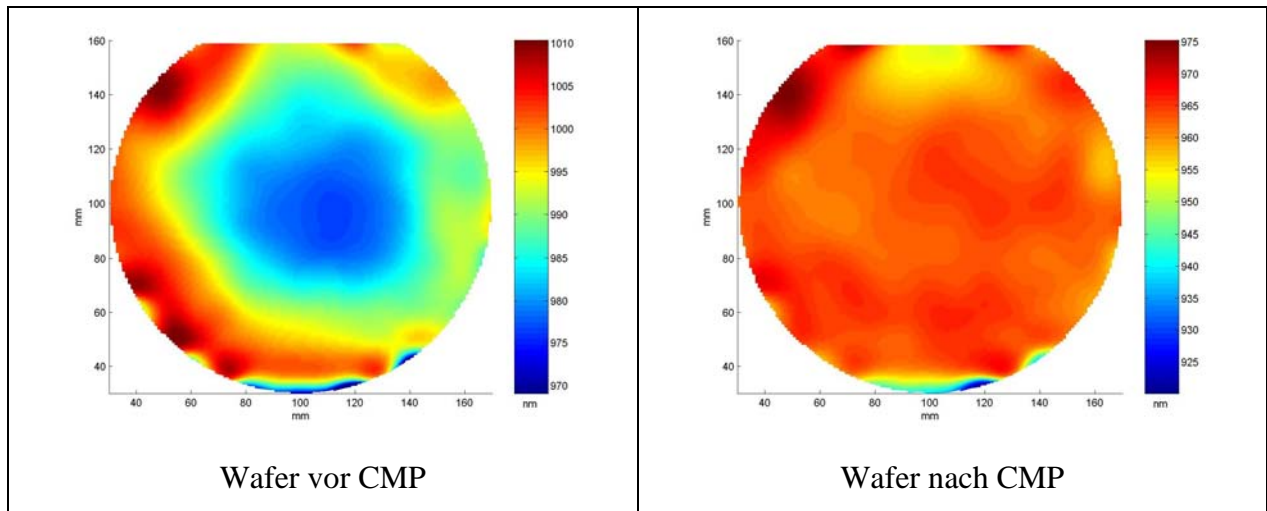


Bild 9: Wafertopographie

ENTWICKLUNGSZIELE

Nach den erfolgreichen Poliersversuchen mit dem 6"-System wurden FEM-Berechnungen eines 12 Zoll Carriers durchgeführt. Die Anzahl und die Breite der einzelnen Ringe (Zonen) kann dabei sehr variabel gestaltet werden, um gezielt Bereiche beeinflussen zu können. Im Bild 10 ist ein Ausführungsbeispiel eines 12" Carriers mit 7 einzeln ansteuerbaren Ringen dargestellt, wobei mittels eines sehr schmalen Ringes (Breite 4 mm) der Randbereich gezielt verstellt werden kann.

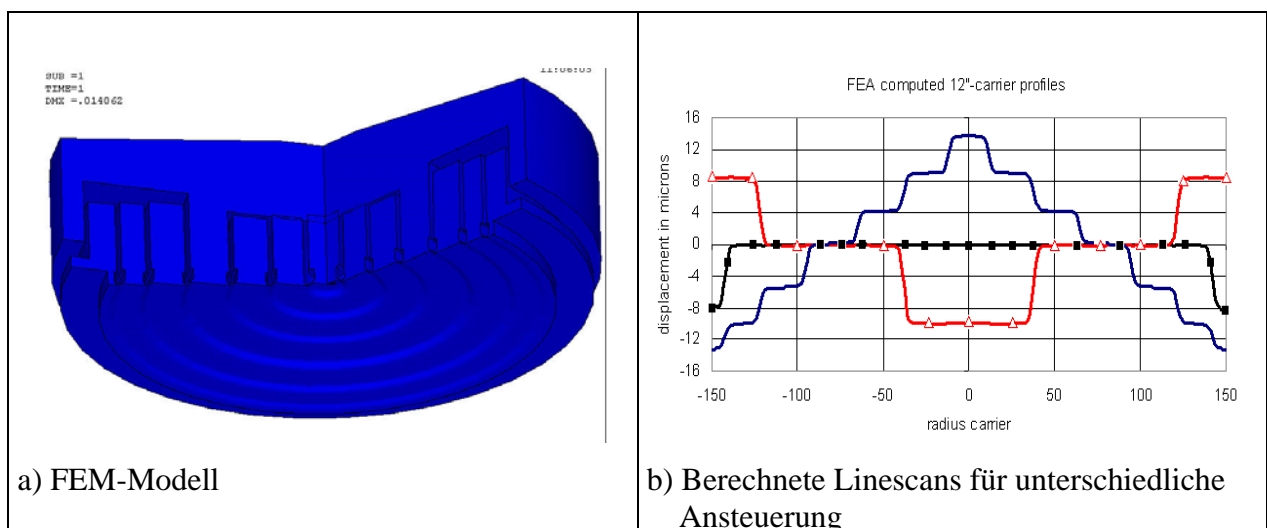


Bild 10: FEM-Berechnung eines 12" Carriers

Das Ergebnis der FEM-Berechnungen ist ein virtueller Prototyp (VCP, Virtual Carrier Profiler) mit dessen Hilfe die Auslegung der Werkzeuge optimiert sowie Algorithmen zur weiteren Verbesserung der Ebenheit (WIWNU - within wafer non-uniformity) und der Produktivität von

CMP-Prozessen unter Produktionsbedingungen entwickelt und getestet werden können (Bild 11).

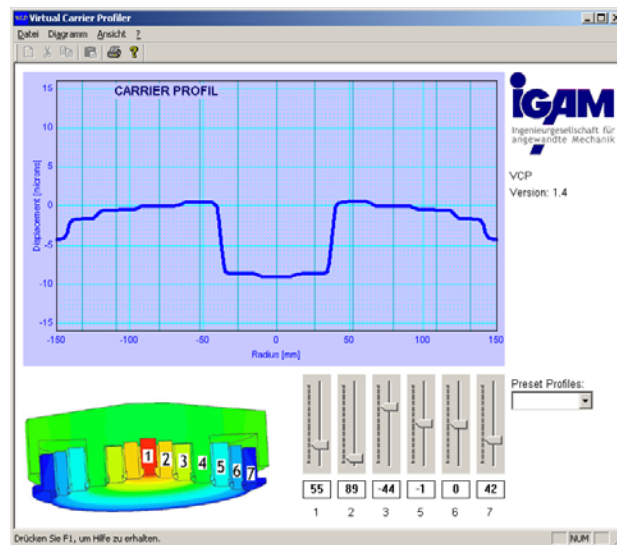


Bild 11: Oberfläche Virtual Carrier Profiler

Ziel des Entwicklungsprozesses ist ein adaptives System, bei dem mittels integrierter Kraft- bzw. Drucksensorik das vorhandene Druckprofil in-situ während der Bearbeitung gemessen werden kann. Über eine Regelung des lokalen Polierdruckes wird somit entsprechend der Preston-Hypothese das gewünschte Abtragsprofil über der Waferfläche eingestellt.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Weber, Ch.-T.; Weiser, J. : Formadaptiver Chuck, 11. CMP User Meeting, Itzehoe, October 2003.
- [2] Final report ADAMES-Adaptive mechanische des DFG-Innovationkollegs INK 25B I-1, Otto von Guericke University Magdeburg, Magdeburg 2001.
- [3] Nishiguchi, T.;CMP Consumable Technologies in PERL Hitachi, Hitachi Ltd. Production Engineering Research Lab. 2001.
- [4] Müftü, S.; Busnaina, A.; Adams, G.: The Mechanics of CMP and Post-CMP Cleaning, Dept. of Mechanical, Industrial and Manuf. Engineering, Northeastern Univ., Boston. (Referenzen: Times 8pt)

Autorenangabe(n):

Dr. Christian-Toralf Weber

Dr. Michael Markworth

Dr. Jürgen Weiser

IGAM Ingenieurgesellschaft für angewandte Mechanik mbH, Steinfeldstraße 3-5

39179 Barleben/Magdeburg

Tel.: 039203/89896

Fax: 039203/898989

E-mail: info@igam-mbh.de

Dr. Volker Herold

Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie, Löbdergraben 32

07743 Jena

Tel.: 03641/947753

Fax: 03641/947702

E-mail: volker.herold@uni-jena.de